

АНАЛИЗ СТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ ЦИФРОВОГО СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТЫ В КАЧЕСТВЕ ВОЗБУДИТЕЛЯ РЕФЛЕКТОМЕТРА

Борохов И. В.

Таврический государственный агротехнологический университет

Проведен анализ стабильности частоты и спектральной чистоты выходного сигнала синтезатора частоты с учетом нелинейной природы системы фазовой подстройки частоты.

Постановка проблемы. Использование электромагнитных излучений в сельском хозяйстве открывает новые возможности создания эффективных электромагнитных технологий для лечения животных, переработки и хранения сельскохозяйственной продукции. Однако, создание таких технологий невозможно без знаний о величине диэлектрической проницаемости органов и тканей, биологических объектов растениеводства. В связи, с чем является актуальной задачей разработка возбудителей рефлектометрических систем на основе цифрового синтезатора частоты для дистанционного измерения диэлектрической проницаемости биологических объектов [1].

Анализ последних исследований и публикаций. Теория и техника систем синтеза частот получила широкое внедрение в различных областях радиотехники и автоматики [2]. Однако синтезу частот в рефлектометрических системах для применения их в областях сельского хозяйства, медицине и биологии уделено недостаточно внимания.

Цель статьи. Проведение теоретических исследований для оценки стабильности частоты цифрового синтезатора частоты рефлектометрических систем.

Основные материалы исследования. Как показывает анализ основных характеристик синтезатора частоты: диапазона рабочих частот, шага сетки частот, стабильности частоты, уровня побочных составляющих, фазовых шумов и времени переключения (быстродействия) важнейшими являются стабильность частоты и спектральная чистота выходного сигнала.

Для анализа стабильности частоты синтезатора используем метод функциональных разложений Вольтерра, который является одним из наиболее удобных и точных методов анализа нелинейных динамических систем. С этой целью рассмотрим эквивалентную модель ФАПЧ синтезатора частоты (рис. 1).

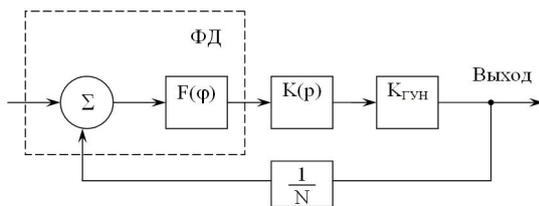


Рисунок 1 – Эквивалентная модель ФАПЧ синтезатора частоты

Дифференциальное уравнение, описывающее такую модель, можно записать в виде [5]:

$$\dot{\varphi} + \Omega_y K(p) F\left(\frac{\varphi}{N}\right) = \dot{x}, \quad (1)$$

где φ – разность фаз сигналов кварцевого и ГУН генераторов;

Ω_y – полоса удержания;

$K(p)$ – передаточная функция фильтра нижних частот (ФНЧ);

$F(\varphi) = \sin[\varphi/N]$ – приведенная характеристика фазового детектора;

N – коэффициент деления делителя с переменным коэффициентом деления (ДПКД) частоты в синтезаторе;

$\dot{x} = x(t)$ – возмущения, действующее на систему ФАПЧ, обусловленные внутренними шумами схемы.

Решение уравнения (1) будем искать в виде усеченного ряда Вольтерра. Считая характеристику фазового детектора синусоидальной, и разлагая её в ряд Тейлора, была получена система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varphi}_1(t) + \Omega_y K(p) \varphi_1(t) / N &= x(t) \\ \dot{\varphi}_2(t) + \Omega_y K(p) \varphi_2(t) / N &= 0 \\ \dot{\varphi}_3(t) + \Omega_y K(p) \varphi_3(t) / N &= \frac{\Omega_y K(p)}{3!N^3} \varphi_1^3(t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Применив многомерные преобразования Лапласа к обеим частям уравнений (2), получим выражение для ядер Вольтерра в операторной форме:

$$H_1(p_1) = \frac{1}{p_1 + \Omega_y K(p_1) \cdot 1/N};$$

$$H_2(p_1, p_2) = 0; \quad H_3(p_1, p_2, p_3) = \frac{1}{3!N^3} \times$$

$$\times \frac{\Omega_y K(p_1 + p_2 + p_3)}{(p_1 + p_2 + p_3) + \Omega_y K(p_1 + p_2 + p_3) \cdot 1/N} \times \quad (3)$$

$$\times \prod_{i=1}^3 \frac{1}{p_i + K(p_i) \Omega_y \cdot 1/N}.$$

Известно [5], что спектр выходного сигнала $\varphi(t)$ нелинейной динамической системы, описываемой совокупностью N ядер Вольтерра в операторной форме вида $H_n(p_1, \dots, p_n)$, может быть записан как:

$$\Phi(p) = \sum_{n=1}^N \dot{A} \left\{ H_n(p_1, \dots, p_n) \prod_{i=1}^n X(p_i) \right\}. \quad (4)$$

при $p = j\omega$,

где A – оператор приведения к одной переменной.

Комбинируя (3) и (4) после перехода к спектральной плотности мощности флуктуаций фазы $S_\varphi(\omega)$ имеем

$$S_\varphi(\omega) = b^2 \Omega_y^2 \left\{ 1 + \frac{1}{3!} b^2 \Omega_y^3 \frac{K_1 \omega^6 + K_2 \omega^4 + K_3 \omega^2 + K_4}{L_1 \omega^8 + L_2 \omega^4 + L_3 \omega^2 + L_4} \right\} \times \frac{m^2 \omega^2 + 1/T^2}{\omega^4 + \frac{1}{T^2} [1 + 2T\Omega_y(m-1) + m^2 T^2 \Omega_y^2] \omega^2 + \left(\frac{\Omega_y}{T} \right)^2}, \quad (5)$$

где $b^2 [1/\Gamma\text{ц}]$ – отношение шум – сигнал по мощности в полосе сигнала;

$m = R_1/(R_1 + R_2)$ – коэффициент пропорционально-интегрирующего ФНЧ;

$T = (R_1 + R_2)C$ – постоянная времени ФПЧ;

$$L_1 = B_1^2 - 2B_2; L_2 = B_2^2 - 2B_1B_3 + 2B_4;$$

$$L_3 = B_3^2 - 2B_4B_2; L_4 = B_4^2;$$

$$K_1 = - \left[2A_2 + A_1 (2B_1 - A_1) \frac{b^2 \Omega_y^3}{3!} \right];$$

$$K_2 = 2A_1 + 2A_2 \left(2B_2 + A_2 \frac{b^2 \Omega_y^3}{3!} \right) + A_3 \left(2B_1 - A_1 \frac{b^2 \Omega_y^3}{3!} \right) - A_1 \left(2B_3 + A_3 \frac{b^2 \Omega_y^3}{3!} \right);$$

$$K_3 = - \left[A_4 \left(2B_2 - A_2 \frac{b^2 \Omega_y^3}{2!} \right) + A_2 \left(2B_4 + A_2 \frac{b^2 \Omega_y^3}{3!} \right) - A_3 \left(2B_3 + A_3 \frac{b^2 \Omega_y^3}{3!} \right) \right];$$

$$K_4 = A_4 \left[2B_4 + A_4 \frac{b^2 \Omega_y^3}{3!} \right]; \quad A_1 = (A+C)^3;$$

$$A_2 = 3A^3 (B+2D) + 3A^2 C (3D+4B) +$$

$$+ 3AC^2 (5B+4D) + 3C^3 (2B+D);$$

$$A_3 = A^3 (11D^2 + 4BD + 2B^2) + 9AC^2 (2B^2 + 6BD + D^2) +$$

$$+ 9AC^2 (B^2 + 6BD + 2D^2) + C^3 (11B^2 + 14BD + 2D^2);$$

$$A_4 = 3(A^3 D + BC^3) (2B^2 + 5BD + 2D^2) +$$

$$+ 27ABCD [C(2B+D) + A(2D+B)];$$

$$B_1 = 6 \left(\frac{1}{T} + m\Omega_y \right); \quad B_2 = 11 \left(\frac{1}{T} + m\Omega_y \right)^2 + \frac{\Omega_y}{T};$$

$$B_3 = 6 \left(\frac{1}{T} + m\Omega_y \right)^3 + 3D \frac{\Omega_y}{T} \left(\frac{1}{T} + m\Omega_y \right);$$

$$B_4 = 3 \left(\frac{\Omega_y}{T} \right)^2 + 18 \frac{\Omega_y}{T} \left(\frac{1}{T} + m\Omega_y \right);$$

$$A+C = m; \quad BC+AD = 1/T; \quad B+D = 1/T + m\Omega_y; \quad BD = \Omega_y/T.$$

Для расчета характеристики стабильности подставим (5) в выражение для относительного значения среднеквадратического отклонения частоты выходного сигнала СЧ от среднего значения для данного времени измерения τ .

$$\frac{\sigma[\langle \varphi \rangle \tau]}{f_0} = \left(\frac{2}{\omega_0^2 \tau^2} \int_0^\infty S_\varphi(\omega) \sin \frac{\omega \tau}{2} d\omega \right)^{1/2}, \quad (6)$$

где $f_0 = \omega/2\pi$ – номинальное значение частоты выходного сигнала СЧ.

Выводы. Как показали расчеты и экспериментальные результаты для синтезатора частоты с параметрами $b^2 = 10^{-3} \text{ Гц}^{-1}$; $\Omega_y = 40 \text{ мГц}$; $N = 20$; $m = 0,5$; $T = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ с}$; $f_0 = 1,15 \text{ ГГц}$ нестабильность частоты синтезатора за время 10^{-3} с составила 10^{-6} .

Список использованных источников

1. Лоутон Р. Э. Импульсные измерения во временной области / Р. Э. Лоутон, С. М. Риад, Дж. Р. Эндрюс // ТИИЭР. – 1986. – Т.74. – №1. – С.87–92.

2. Шапиро Д. Н. Основы теории синтеза частот / Д. Н. Шапиро, А. А. Паин. – М.: Радио и связь, 1981. – 264с.

3. Идентификация и оптимизация нелинейных стохастических систем / [Попков Ю. С., Киселев О. Н., Петров Н. П. и др.]. – М.: «Энергия», 1976. – 439с.

Анотація

АНАЛІЗ СТАБІЛЬНОСТІ ЧАСТОТИ ЦИФРОВОГО СИНТЕЗАТОРИ ЧАСТОТИ В ЯКОСТІ ЗБУДЖУВАЧА РЕФЛЕКТОМЕТРА

Борохов І. В.

Проведено аналіз стабільності частоти і спектральної чистоти вихідного сигналу синтезатора частоти з урахуванням нелінійної природи системи фазового підстроювання частоти.

Abstract

ANALYSIS OF STABILITY OF FREQUENCY DIGITAL FREQUENCY SYNTHESIZER AS THE CAUSATIVE AGENT OTRD

I. Borohov

The analysis of frequency stability and spectral purity of the output frequency synthesizer, taking into account the nonlinear nature of a system phase-frequency adjustment.